

基于跨层设计的无线传感器网络节能双向梯度路由算法

任智 徐中浩* 曹建玲 陈前斌

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘要: 针对现有无线传感器网络梯度路由算法在下行路由创建过程和能量更新机制中存在冗余控制开销的问题, 该文提出一种采用跨层和功率控制机制, 具有节能功能的双向梯度路由算法(Cross-layer Energy-efficient Bidirectional Routing, CEBR): 无需使用专门的控制分组, 采用源路由方式以较小开销建立从 Sink 节点通往传感器节点的下行路由; 通过跨层信息共享, 定期采集节点剩余能量信息并按需发布; 设计使用含跳数和节点剩余能量的合成路由度量标准, 减少节点能量和网络带宽消耗的同时均衡节点能耗; 结合 RSSI(Received Signal Strength Indication)测距实现节点发射功率控制从而在数据及查询分组发送过程中节约节点能量。理论分析表明了 CEBR 的有效性; 仿真结果显示: 与现有的典型相关算法相比, CEBR 能够在建立双向梯度路由的前提下, 至少降低 34.5% 的归一化控制开销和 27.12% 的数据分组平均能耗, 并使网络生存期延长 18.98% 以上。

关键词: 无线传感器网络; 梯度路由; 双向传输; 节能; 跨层设计

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)01-0133-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00368

A Cross-layer Energy-efficient Bidirectional Gradient Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks

Ren Zhi Xu Zhong-hao Cao Jian-ling Chen Qian-bin

(Key Laboratory of Mobile Communications Technology of Chongqing, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To reduce the redundant control overhead in the process of creating downstream routes and the mechanism of updating energy information, a Cross-layer Energy-efficient Bidirectional Routing(CEBR) algorithm is proposed. CEBR establishes downstream routes from the sink node to sensor nodes by the means of source routing and obtains the information of nodes' residual energy through cross-layer information sharing. An integrated routing criterion which includes hop counts and nodes' residual energy is designed to balance nodes' energy consumption. In addition, a power control mechanism is presented to save nodes' energy based on Received Signal Strength Indication (RSSI). Theoretical analysis verifies the effectiveness of CEBR. Also, simulation results show that CEBR reduces at least 34.5% of the normalized control overhead and 27.12% of the average energy consumption of a data packet, and extends the network lifetime by at least 18.98%, as compared to the existing classic algorithms.

Key words: Wireless Sensor Networks (WSN); Gradient routing; Bidirectional transmission; Energy conservation; Cross-layer design

1 引言

无线传感器网络^[1]是一种综合了检测、无线通信和计算机网络技术, 用于数据采集和传输的自治系统。由于无线传感器承担的检测、处理和通信等多种任务消耗大量能量和无线带宽, 而传感器节点的

能量、计算、存储资源和通信能力较为有限, 因此无线传感器网络面临着较大的能量和带宽等资源压力^[2], 需要采用合理节能的路由算法来实现数据分组的多跳传输, 路由算法设计的首要目标因而成为了高效使用节点能量资源, 延长网络生存期^[3-5]。根据采用的网络拓扑结构的不同, 无线传感器网络路由算法大体可分为基于平面拓扑的平面路由算法和基于分层拓扑的分级路由算法两大类。

无线传感器网络平面路由算法根据网络拓扑属于平面类型, 网络节点地位平等的特点而设计。基于梯度的路由算法是一类平面路由算法, 它在初始

2012-03-31 收到, 2012-10-17 改回

国家自然科学基金(60972068), 教育部留学回国人员科研启动基金(2010-1561), 应急通信重庆市重点实验室开放课题(201201)和重庆市科委重点实验室专项经费(D2011-24)资助课题

*通信作者: 徐中浩 xzh10201@163.com

化时建立传感器节点到Sink节点的路径并获得两者之间的跳数,然后在路由策略中使用该跳数作为基本准则实现数据分组传送。

在无线传感器网络梯度路由方面,人们已开展了一些研究工作。文献[6]提出了一种基于梯度的路由算法(Gradient-Based Routing, GBR),它在定向扩散路由算法^[7](Directed Diffusion, DD)的基础上,将传感器节点距离Sink节点的跳数作为节点的高度,节点之间的高度差就是链路的梯度,数据分组沿着梯度最大的方向传递;但该算法没有建立Sink节点到传感器节点的下行路由,无法支持Sink节点的查询功能。文献[8]提出的基于梯度的路由算法在选择路径时使用跳数和能量作为标准,有利于实现节点能耗均衡,但该算法也没有建立下行路由而且因在能量更新机制上使用周期性广播分组带来一定的额外控制开销。在文献[9]提出的最小跳数路由算法(Minimum Hop Routing Protocol, MHRP)中,Sink节点广播一个控制分组通知全网所有节点发送自己的路由表给它,从而建立从传感器节点通往Sink节点的上行路由;在上行路由选择时使用跳数和能量作为标准,有利于节点能耗均衡;但该算法使用ACK分组发布能量更新信息并且在下行路由创建过程中使用专门的控制分组,带来了额外的能量和带宽开销。文献[10]提出了一种基于最小跳数分层的能量相关路由算法(Energy-related Routing Protocol of Minimum-Hop Layer, ER-MHL),建立最小跳数分层模型,在上行路由选择中考虑节点能量因素,有利于实现节点能耗均衡;但在下行路由中因使用Flooding方式发送查询分组会导致节点能量额外消耗。文献[11]以GBR算法为基础,提出精细化梯度值(Fine-grain Gradient Value, FGV)的概念,将加权平均后的跳数信息作为精细化梯度值,将其作为上行路由选择标准,有利于实现数据流“外疏内密”,但会增加数据分组的转发跳数。文献[12]在GBR算法中引入基于预测的副本数量控制机制,提出一种基于副本控制的最小跳数路由(Duplicate Controlled-based Minimum Hop Routing, DCMHR)算法,通过减少数据分组的副本数量,以及在传输数据分组时避开网络瓶颈节点,缓解了MHR算法中关键节点过早死亡的问题,但在上行路由选择时没有考虑节点剩余能量且未考虑建立下行路由。文献[13]将梯度路由算法应用于实时工业无线传感器网络,在建立梯度路由时考虑两跳节点信息,有助于减少网络能耗及分组时延;但获取两跳节点信息增加了额外开销。文献[14]提出了基于最小跳数的最大能量利用路由算法,通过退避等待机制减少梯度建

立阶段的洪泛开销,采用多径路由机制实现数据传输,有利于提高数据传输成功率;但该算法对节点能量更新机制考虑较少。

由上可知,目前大多数基于梯度的无线传感器网络路由算法没有建立从Sink节点到传感器节点的下行路由,无法支持Sink节点的查询功能,少数建立了下行路由的算法也存在开销偏大及没有考虑能量因素等问题;在上行路由中使用控制分组更新节点剩余能量信息也带来额外开销。为了解决这些问题,本文在前期研究^[15]的基础上,提出一种使用跨层设计和功率控制,具有节能功能的无线传感器网络双向梯度路由算法(Cross-layer Energy-efficient Bidirectional Routing, CEBR),无需使用专门的控制分组,采用源路由方式以较小开销建立下行路由;通过跨层信息共享实现节点剩余能量信息的发布和更新以减少开销;综合使用跳数和节点剩余能量作为路由度量标准,同时结合RSSI(Received Signal Strength Indication)测距和功率控制机制,减少节点能量和网络带宽消耗的同时均衡节点能耗。

本文后续部分安排如下:第2节给出数学模型并描述问题;第3节详述提出的跨层节能双向梯度路由算法并对算法性能进行分析;第4节进行仿真分析;第5节为结束语。

2 模型和问题描述

2.1 网络模型

用图 $G=(V,E)$ 表示一个无线传感器网络;其中节点集合 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $n>1$,为网络节点数, v_n 表示网络中第 n 个节点;链路集合 $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, e_m 表示网络中第 m 条链路, $1 \leq m \leq n(n-1)/2$ 。关于无线传感器网络有如下假设:(1)Sink节点位于网络区域中心,传感器节点随机部署,节点部署后不再移动;(2)Sink节点能量充足,传感器节点具有相同的初始能量和通信半径 R ,并且节点间的通信链路双向连通。

2.2 能耗模型

通常情况下,无线传感器节点发送和接收 k bit信息所消耗的能量 E_{Tx} 和 E_{Rx} ,可分别由式(1)和式(2)计算^[16]:

$$\left. \begin{aligned} E_{Tx}(k, d) &= kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ E_{Tx}(k, d) &= kE_{elec} + k\varepsilon_{amp}d^4, & d \geq d_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$E_{Rx}(k, d) = kE_{elec} \quad (2)$$

其中 E_{elec} 为发送和接收单位比特信息的损耗常量;若传输距离小于阈值 d_0 ,功率放大损耗采用自由空间模型;当传输距离大于等于阈值 d_0 时采用多路径衰减模型。 ε_{fs} 和 ε_{amp} 分别为这两种模型中发送放大器

每发送单位比特信息所需能量， d_0 为功率放大损耗采用不同模型时的距离阈值， d 为两节点间距离。式(1)和式(2)用到的参数具体值参见表1。

表1 能耗模型参数值

参数	取值
d_0 (m)	87
E_{elec} (nJ/bit)	50
ϵ_{fs} (pJ/(bit · m ²))	10
ϵ_{amp} (pJ/(bit · m ⁴))	0.0013

d_0 越小，则采用多路径衰减模型的概率越大，发送信息所需要消耗的能量也越大，网络生存期和保持正常路由性能的时间会缩短；反之，则采用自由空间模型的概率越大，发送信息所需要消耗的能量越小，网络生存期和保持正常路由的时间增加。

2.3 问题描述

一个能量高效的无线传感器网络路由算法需要具备下列特点：(1)减小不必要开销，最大化网络寿命；(2)均衡转发节点的能量，避免部分节点过早死亡；(3)实现数据分组可靠传输并满足Sink节点的查询功能。而现有的梯度路由算法因存在以下3个问题而未能同时具备上述3个特点：(1)大多数算法在梯度建立阶段仅建立了上行路由，无法支持Sink节点查询功能，而个别建立了下行路由的算法存在开销过大的问题；(2)选用能量和跳数作为上行路由选择标准时存在能量信息更新不及时和开销过大的问题；(3)下行路由选择时没有考虑能量因素，无法实现节点能耗均衡。上述问题将在本文提出的新算法CEBR中加以解决。

3 跨层节能双向梯度路由算法

本文提出的无线传感器网络跨层节能双向梯度路由算法CEBR包含路由创建和数据分组传输两个阶段；而路由创建阶段又由上、下行路由创建两部分组成。

3.1 路由创建

3.1.1 上行路由创建过程 Sink节点以Flooding方式在全网广播上行路由创建分组；该分组中包含节点ID，节点距离Sink节点的跳数TTL以及节点剩余能量(residual energy)等。传感器节点收到上行路由创建分组后根据其中信息获得自己到Sink节点的梯度并建立上行路由；具体步骤如下：

(1)初始化时，Sink节点跳数(TTL)设置为0，其它节点跳数(TTL)设置为无穷大。Sink节点以通信

半径 R 广播一个上行路由创建分组。

(2)传感器节点 i 收到节点 n 广播的上行路由创建分组时，根据RSSI测距计算出与 n 的实际距离 d_{in} 并保存在邻居距离表中，然后根据路由创建分组的信息作如下处理：(a)若 $TTL_i > TTL_n + 1$ 。则置 $TTL_i = TTL_n + 1$ ，并清空现有上行路由表内容，保存节点 n 的ID, TTL_n 和剩余能量；然后将上行路由创建分组中的相应值更新为自己的信息广播给邻居节点。(b)若 $TTL_i = TTL_n + 1$ ，则只在上行路由表中添加节点 n 的ID, TTL_n 和剩余能量，并将收到的上行路由创建分组丢弃。(c)若 $TTL_i < TTL_n + 1$ ，则不做任何处理并将上行路由创建分组丢弃。

3.1.2 下行路由创建过程 下行路由创建过程中采用源路由方式，无需专门的控制分组，从而减小网络开销。具体步骤如下：

(1)每个传感器节点在发往Sink节点的第1个数据分组的头部建立一个长度根据梯度预定且可变的路由中继表，依次记录该数据分组经过的中继转发节点的ID，并实时更新分组经历的跳数信息，直至到达Sink节点，如图1所示。

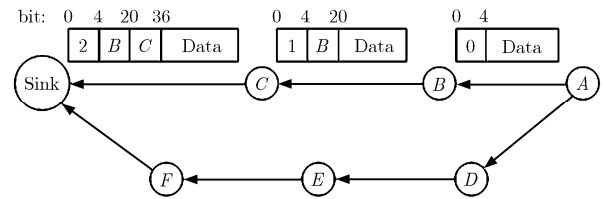


图1 下行路由创建示意图

(2)当传感器节点收到其它节点发送的第1个数据分组时，先判断自己是否发送或转发过数据分组；如果是，则提取出数据分组头部的路由中继表并根据其中的信息更新自己下行路由表的相应表项，然后将自己的ID写入路由中继表并更新路由中继表中的跳数信息，最后将该数据分组发送给下一跳节点；如果不是，则只需根据路由中继表中的内容更新自己的下行路由表并更新路由中继表中的跳数信息，然后将该数据分组发送给下一跳节点。如果传感器节点在预定的时间内，没有发送或转发任何数据分组，则向Sink节点发送一个不包含内容的数据分组。

(3)在上行数据分组传送过程中，接收数据分组的节点根据数据分组头部信息，检查下行路由表中是否有到数据源节点的路由；若是，则更新该路由；否则，在下行路由表中建立到数据源节点的路由。

3.1.3 数据分组传输 数据分组传输阶段的上、下行路由使用跳数和剩余能量作为标准：在跳数优先的情况下，选择剩余能量多的节点为下一跳节点。本

文提出1种新的路径长度度量机制—合成跳数,记为 H_c ,其定义为

$$H_c = TTL_c + (E_i - E_r) / E_i \quad (3)$$

其中 TTL_c 表示节点距离Sink节点的跳数, E_r 表示节点的剩余能量, E_i 表示统一的节点初始能量。

$$\begin{aligned} \because E_i \geq E_r \geq 0, \therefore 0 \leq (E_i - E_r) / E_i \leq 1; \\ \Rightarrow TTL_c \leq H_c \leq TTL_c + 1 \end{aligned}$$

节点选择 H_c 小的邻居作为下一跳。从式(3)可看出:在 TTL_c 相等的情况下,剩余能量 E_r 高,则合成跳数 H_c 低,节点被选中的概率大,从而有助于实现节点能耗均衡,延长网络生存期。

当节点 i 有分组需要发送时,先查找自己的路由表,找出合成跳数 H_c 最小的节点(设为 j),并在邻居距离表中查找出与该节点的实际距离 d_{ij} ,然后根据 d_{ij} 调整发射功率,将分组发送给 j 。

3.1.4 能量信息的跨层获取、发布和更新 节点剩余能量信息的获取、发布和更新机制通过使用跨层报告功能和ACK帧携带信息的方式实现,与现有算法相比避免了专门的分组的使用,节约了节点能量和网络带宽。具体如下:

(1)传感器节点定时在物理层测得自己的剩余能量值,然后通过跨层报告功能将能量信息报告给网络层和MAC层,更新原来存储的剩余能量信息。

(2)节点收到其它节点发送给自己的数据分组,在向对方回复ACK帧时,如果剩余能量值的变化达到一定程度(分级),则将节点剩余能量信息装入ACK帧中,发送给对方,如图2所示。IEEE 802.11标准^[17]规定,ACK帧的Frame Control域中To DS, From DS, More Frag, Retry, Protected Frame, Order等字段的值为0且保持不变;因此本文使用它们携带能量信息,从而避免了兼容性问题。

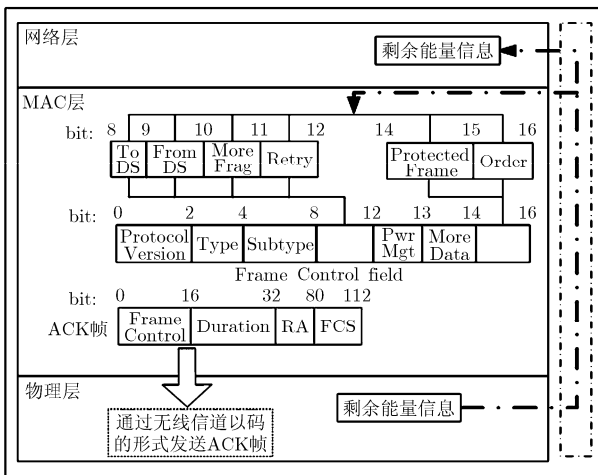


图2 跨层信息共享示意图

(3)节点收到ACK帧后,提取出Frame Control域中To DS, From DS, More Frag, Retry, Protected Frame, Order等字段的值,将其组合后获取剩余能量信息,用它们更新路由表的相应表项。然后将这些字段的值还原为默认值0。

3.1.5 结合 RSSI 和功率控制的节能机制 本文在CEBR算法中设计了一种结合RSSI和功率控制的节能机制,其基本思路是通过RSSI测得到节点距离,在分组发送过程中根据节点距离调整发射功率,避免每次都使用最大发射功率,从而节约能量;具体如下:

(1)节点在接收分组的过程中,物理层跨层向网络层报告接收功率值,网络层根据RSSI机制计算出与邻居节点的距离并存储在邻居距离表中。

(2)节点 i 向邻居 j 发送分组时,先在邻居距离表中查出自己与 j 的距离 d_{ij} ,然后查找预先建立的“距离-发射功率表”确定发射功率值,并将该值跨层传送给物理层,物理层据其调整发射功率后将分组发送给 j 。

3.2 性能分析

关于CEBR的性能,有如下引理:

引理1 如果传感器节点向Sink节点发送一个数据分组,CEBR在传输路径上消耗的能量小于MHRP和ER-MHL。

证明 MHRP和ER-MHL的工作机理是:用Flooding方式建立传感器节点到Sink节点的路由;当传感器节点有数据分组要发送时,在上行路由表中选择剩余能量最大的父节点作为下一跳节点,父节点在收到该数据分组后,会回复ACK分组给子节点,确认数据分组的接收并更新自己的能量信息。而CEBR根据实际距离调整发射功率后发送数据分组,且通过ACK帧回复能量信息。设 C_C, C_M 和 C_E 分别表示CEBR, MHRP和ER-MHL在同样网络拓扑情况下由节点 i 发送一个数据分组给Sink节点时整个传输路径上消耗的能量。其中 l_D 表示数据分组长度, l_A 表示ACK分组长度, TTL_i 表示源节点 i 距离Sink节点的跳数。 R 为节点通信半径, d_j 表示由RSSI计算得到的节点距离;有

$$\begin{aligned} C_C &= \sum_{j=1}^{TTL_i} [E_{Tx}(l_D, d_j) + E_{Rx}(l_D, d_j)] \\ &\leq TTL_i [E_{Tx}(l_D, R) + E_{Rx}(l_D, R)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_M = C_E &= TTL_i [E_{Tx}(l_D, R) + E_{Rx}(l_D, R)] \\ &+ TTL_i [E_{Tx}(l_A, R) + E_{Rx}(l_A, R)] \end{aligned} \quad (5)$$

则由式(4),式(5)可知

$$\begin{aligned} C_M - C_C &\geq TTL_i [E_{Tx}(l_A, R) + E_{Rx}(l_A, R)] > 0 \\ \Rightarrow C_M - C_C &> 0 \Rightarrow C_C < C_M, C_C < C_E \end{aligned}$$

证毕

引理2 如果Sink节点向传感器节点发送一个查询分组，CEBR在传输路径上的能量消耗不大于MHRP和ER-MHL。

证明 ER-MHL使用洪泛方式实现查询分组发送；MHRP通过在Sink节点建立全局下行路由表，当Sink节点有查询分组发送时，Sink节点查找全局路由表选择一条通往目的节点的路径并将该路径装入查询分组头部，其它节点收到该查询分组后根据头部携带的路径信息选择下一跳节点进行转发；CEBR中通过源路由方式在各个节点建立下行路由表，节点收到查询分组后，查找下行路由表选择出合成跳数最小的节点为下一跳节点，且根据两节点间的实际距离调整发射功率后将该查询分组发送给下一跳节点。设 Q_C 、 Q_M 和 Q_E 分别表示CEBR、MHRP和ER-MHL在具有同样网络拓扑情况下Sink节点向节点 i 发送一个查询分组时整个传输路径消耗的能量，其中 l_Q 为查询分组长度， m 为网络节点数， TTL_i 表示Sink节点距离目的节点 i 的跳数。 R 为节点通信半径， d_j 表示节点距离；有

$$Q_C = \sum_{j=1}^{TTL_i} [E_{Tx}(l_Q, d_j) + E_{Rx}(l_Q, d_j)] \leq TTL_i [E_{Tx}(l_Q, R) + E_{Rx}(l_Q, R)] \quad (6)$$

$$Q_M = TTL_i [E_{Tx}(l_Q, R) + E_{Rx}(l_Q, R)] \quad (7)$$

$$Q_E \geq m [E_{Tx}(l_Q, R) + E_{Rx}(l_Q, R)] \quad (8)$$

由式(6)-式(8)可知： $Q_C \leq Q_M$ ， $Q_E - Q_M \geq (m - TTL_i) [E_{Tx}(l_Q, R) + E_{Rx}(l_Q, R)]$ 。因节点数不小于最大跳数，即 $m \geq TTL_{max}$ ，有： $Q_E - Q_M \geq 0 \Rightarrow Q_E \geq Q_M \Rightarrow Q_C \leq Q_E$ 。证毕

引理3 下行路由创建过程中CEBR所用开销低于MHRP。

证明 MHRP创建下行路由的工作原理为：Sink节点在全网范围广播一个ENQ分组；收到该ENQ分组的传感器节点生成1个REPLY分组并将自己的路由表装入其中，然后用单播方式发送给Sink节点；Sink节点收到REPLY分组后建立通往传感器节点的下行路由。CEBR中通过源路由的方式建立下行路由，没有使用专门的控制分组；ER-MHL通过Flooding方式实现下行路由功能，没有专门的下行路由创建过程；但根据引理2可知，它发送一个查询分组所消耗的能量最多。

设CEBR中发送不包含任何内容数据分组的节点概率为 p ($0 \leq p \leq 1$)， N_{CD} 、 N_{MD} 分别为CEBR和MHRP下行路由创建过程中所用开销，则

$$N_{CD} \leq mp l_{null} + m(1-p)l_s \quad (9)$$

$$N_{MD} = m(l_{ENQ} + l_{REPLY}) \quad (10)$$

由式(9)，式(10)可知

$$N_{CD} - N_{MD} \leq m(pl_{null} - l_{ENQ}) + m[(1-p)l_s - l_{REPLY}]$$

其中， m 为网络节点数， l_{null} 为内容为空的数据分组的大小， l_s 为路由中继表中单位空间大小。 l_{ENQ} 为ENQ分组大小， l_{REPLY} 为REPLY分组大小。ENQ分组和空的数据分组只包含分组头部信息。REPLY分组中包含分组头部信息和节点路由表，因此可得： $l_{ENQ} = l_{null}$ ， $l_{REPLY} > l_s$ ，所以 $pl_{null} - l_{ENQ} \leq 0$ ， $[(1-p)l_s - l_{REPLY}] < 0 \Rightarrow N_{CD} < N_{MD}$ 。证毕

引理4 CEBR为更新1次节点能量信息所用开销低于MHRP和ER-MHL。

证明 CEBR更新能量信息与MHRP和ER-MHL采用相同的频率，通常不采用在每个ACK帧中加入能量信息的方式，而是按需发送。MHRP和ER-MHL让节点将能量信息装入ACK分组发送给对方，而CEBR则让节点将能量信息装入ACK帧的Frame Control域中值不变的字段发送给对方。ACK分组为网络层控制分组，在MAC层会将其作为数据帧传输，需要对其进行ACK帧确认回复。设 N_{CE} 、 N_{ME} 和 N_{EE} 分别为CEBR、MHRP和ER-MHL更新1次能量信息所用开销，则有

$$N_{CE} = 0 \quad (11)$$

$$N_{ME} = N_{EE} = l_{ack} + l_A \quad (12)$$

由式(11)，式(12)可知

$$N_{ME} - N_{CE} = l_{ack} + l_A > 0$$

其中 l_{ack} 表示ACK帧长度， l_A 表示ACK分组长度，有 $N_{CE} < N_{ME}$ ， $N_{CE} < N_{EE}$ 。证毕

4 仿真实验

为定量验证CEBR算法的性能，本文通过仿真建模实现了CEBR、MHRP和ER-MHL算法，并对它们的性能进行了定量的比较和分析，仿真结果验证CEBR算法的正确性和有效性。

4.1 统计量定义

(1)归一化控制开销 归一化控制开销=所有节点发送和转发的控制分组比特数/所有节点发送和转发的分组比特数。

(2)数据分组平均消耗能量 数据分组平均消耗能量 E_{avg} 由式(13)定义：

$$E_{avg} = \sum_{i=1}^m E_{ci} / P_{rec} \quad (13)$$

其中 m 为网络节点数， E_{ci} 为节点 i 消耗的能量， P_{rec} 为Sink节点成功接收的数据分组数。

(3)网络生存期 网络生存期=网络中死亡节点数量达到节点总数20%的时刻-网络开始运行的时刻。

(4)数据分组平均端到端时延 数据分组平均端到端时延定义为Sink节点成功接收的所有数据分组的平均时延。

(5)数据分组丢失率 数据分组丢失率=(Sink节点成功接收的数据分组数/传感器节点发送的数据分组总数) \times 100%。

4.2 仿真设置

使用仿真软件平台OPNET14.5模拟在600 m \times 600 m的平面网络拓扑中随机投放传感器节点形成的无线传感器网络。Sink位于网络中心(300, 300)处,除了Sink节点外,所有节点的能量都是有限且初始能量相同,并将初始能量平均划分为 2^n-1 个能量等级,本文中取 $n=6$ 。根据节点数不同设置了5个仿真场景,主要仿真参数如表2所示。

表2 仿真实验中使用的参数

参数	数值
节点数目(个)	40, 80, 120, 160, 200
节点初始能量(J)	1.0
节点通信范围(m)	30
数据分组长度(bit)	4096

本文在实现功率控制和RSSI的节能机制时,根据节点通信范围将发射功率平均划分为6个等级,在OPNET中具体的设置表3所示。

表3 功率等级相关参数设置

节点通信范围(m)	发射功率(W)	接收功率门限(dBm)
30	0.00024	-76
25	0.00017	-76
20	0.00011	-76
15	5.78×10^{-5}	-76
10	2.565×10^{-5}	-76
5	9×10^{-6}	-76

4.3 仿真结果分析

(1)归一化控制开销 从图3可看出,在各个场景中CEBR算法的归一化控制开销至少比MHRP和ER-MHL降低34.5%(节点数=40:(0.050379-0.033)/0.050379 \approx 0.345) \sim 47.4%(节点数=160:(0.042629-0.024)/0.042629 \approx 0.4736),仿真结果与引理3,引理4分析结果一致;分析其原因主要是MHRP在下行路由创建过程中使用额外的控制分组及节点剩余能量更新机制使用ACK分组,导致控制开销偏大;ER-MHL中使用Flooding方式发送查询分组及使用ACK分组更新节点能量信息,也增加了控制开销;

而CEBR在下行路由建立过程中采用源路由方式,在能量信息更新上采用ACK帧携带的方式,没有使用额外的控制分组,因此更为高效。

(2)数据分组平均消耗能量 图4显示,随着网络节点数增加,各种算法的平均能耗都有所增加;与MHRP和ER-MHL相比,CEBR算法至少降低数据分组平均能量消耗27.1%(节点数=40:(0.00177-0.00129)/0.00177 \approx 0.2712) \sim 47.9%(节点数=160:(0.005237-0.00273)/0.005237 \approx 0.4787),仿真结果与引理1,引理2的分析结果一致;分析其原因主要是:在数据分组转发过程中,ER-MHL和MHRP回复ACK分组更新节点能量信息,且ER-MHL采用Flooding方式发送查询分组,增加了节点能量消耗,从而导致了数据分组平均消耗能量高于CEBR。

(3)网络生存期 由图5可知,与MHRP和ER-MHL相比,CEBR算法至少能够延长网络生存期19%(节点数=40:(5080.16-4269.64)/4269.64 \approx 0.1898) \sim 33.6%(节点数=120:(2433.46-1821.34)/1821.34 \approx 0.3361),仿真结果与引理1,引理2分析结果一致。分析其原因在于CEBR的能量更新使用ACK帧方式,减少了控制开销,保护了节点能量。通过RSSI测得节点距离并据此调节发送功率,减小了节点能耗;同时下行路由创建过程中使用源路由方式也减少了能耗,因而节点的平均寿命增加,使得网络生存期延长。

(4)数据分组平均端到端时延 如图6所示,3种算法的数据分组平均端到端时延在每个场景相差不大,随着节点数增加,都出现了上升趋势;分析其主要原因是网络规模增大,导致通信路径上转发节点的数量增加,从而导致分组传送时间增加。各个场景中CEBR算法的平均端到端时延均低于MHRP和ER-MHL,主要原因是由于MHRP和ER-MHL传送的控制分组数量大于CEBR,信道可用带宽降低导致数据分组端到端时延增加。

(5)数据分组丢失率 图7显示了3种算法的数据分组丢失率随着网络节点数的不同而变化的情况。可以看出,3种算法都有很高的可靠性,数据分组丢失率均低于1.3%;但随着网络节点数增加,ER-MHL与MHRP的数据分组丢失率上升,CEBR基本没有变化。分析其原因主要是随着网络节点数的增加,MHRP和ER-MHL传送的控制分组数量显著上升,信道竞争激烈导致数据分组丢失率上升。

5 结束语

作为一种简捷有效的路由方案,梯度路由算法在无线传感器网络中得到较为广泛的研究应用,但现有相关算法在下行建路和能量信息更新方面存在

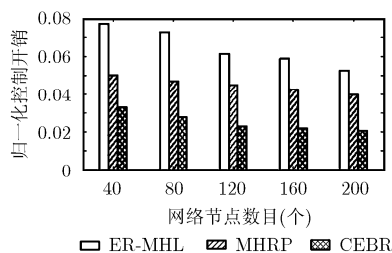


图3 归一化控制开销比较

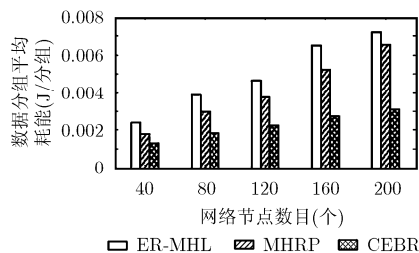


图4 数据分组平均消耗能量比较

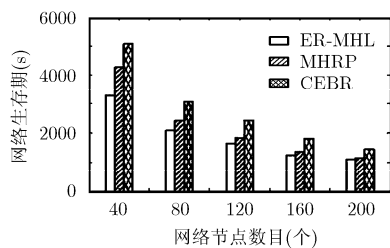


图5 网络生存期比较

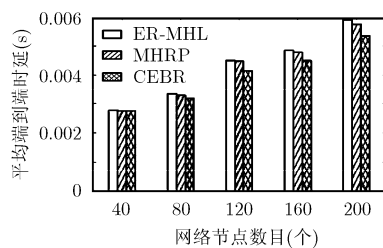


图6 数据分组平均端到端时延

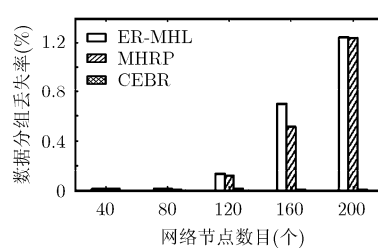


图7 数据分组丢失率比较

冗余。本文所述新算法CEBR采用源路由，跨层信息共享，合成度和功率控制的思路对该问题进行了有效解决。在接下来的工作中，我们将研究节点可移动的无线传感器网络的双向梯度路由的节能机制，结合最优化理论设计绿色的路由算法，为构建绿色无线传感器网络^[18]创造条件。

参 考 文 献

- [1] Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramanian Y, et al. A survey on sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] Giuseppe A, Marco C, Mario D F, et al. Energy conservation in wireless sensor networks: a survey[J]. *Ad hoc Networks*, 2009, 7(3): 537-568.
- [3] Dietrich I and Dressler F. On the lifetime of wireless sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2009, 5(1): 1-38.
- [4] Tavli B, Kayaalp M, Ceylan O, et al. Data processing and communication strategies for lifetime optimization in wireless sensor networks[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2010, 64(10): 992-998.
- [5] Uster H and Lin H. Integrated topology control and routing in wireless sensor networks for prolonged network lifetime [J]. *Ad hoc Networks*, 2011, 9(5): 835-851.
- [6] Schurgers C and Srivastava M B. Energy efficient routing in wireless sensor networks[C]. *IEEE Military Communications Conference*, Virginia, USA, IEEE Press, 2001: 357-361.
- [7] Intanagonwiwat C, Govindan R, and Estrin D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks[C]. *The Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, USA, ACM Press, 2000: 56-67.
- [8] Luo G C and Yan T. Research for wireless sensor network best-hop routing algorithm[C]. *The International Conference on Convergence Information Technology*, Gyeongju, Korea, IEEE Press, 2007: 2015-2018.
- [9] Chiang S S, Huang C H, and Chang K C. A minimum hop routing protocol for home security systems using wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53(4): 1483-1489.
- [10] Zhang J Z. An energy-related routing protocol of minimum-hop layer in wireless sensor networks[C]. *The International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, Wuhan, China: IEEE Press, 2009: 87-91.
- [11] 朱红松, 孙利民, 徐勇军, 等. 基于精细化梯度的无线传感器网络汇聚机制及分析[J]. *软件学报*, 2007, 18(5): 1138-1151. Zhu Hong-song, Sun Li-min, Xu Yong-jun, et al. Mechanism and analysis on fine-grain gradient sinking model in wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2007, 18(5): 1138-1151.
- [12] 郑明才, 张大方, 骆坚, 等. 基于预测的传感器网络副本自适应控制机制[J]. *计算机研究与发展*, 2011, 48(2): 296-305. Zheng Ming-cai, Zhang Da-fang, Luo Jian, et al. Adaptive controlling mechanism for data duplicates based on prediction in WSN[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2011, 48(2): 296-305.
- [13] Quang P T A and Kim D S. Enhancing real-time delivery of gradient routing for industrial wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(1): 61-68.
- [14] Liu Y S and Wang Z. Maximizing energy utilization routing

- scheme in wireless sensor networks based on minimum hops algorithm[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2012, 38(3): 703-721.
- [15] 任智, 陈前斌. 无线传感器网络中基于跳数和能量的跨层双向路由方法[P]. 中国专利, CN101562861B, 2011.4.
Ren Zhi and Chen Qian-bin. A cross-layer bidirectional routing method for wireless sensor networks based on hop count and energy[P]. China Patent, CN101562861B, 2011.4.
- [16] 刘安丰, 徐娟, 陈志刚. 无线传感器网络能量均衡消耗的 TDMA 调度算法 [J]. *计算机研究与发展*, 2010, 47(2): 245-254.
Liu An-feng, Xu Juan, and Chen Zhi-gang. A TDMA scheduling algorithm to balance energy consumption in WSNs[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 47(2): 245-254.
- [17] IEEE Std 802.11-2012, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications[S]. LAN/WAN Standards Committee, 2012.
- [18] 林闯, 田源, 姚敏. 绿色网络和绿色评价: 节能机制、模型和评价[J]. *计算机学报*, 2011, 34(4): 593-612.
Lin Chuang, Tian Yuan, and Yao Min. Green network and green evaluation: mechanism, modeling and evaluation[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2011, 34(4): 593-612.
- 任 智: 男, 1971 年生, 博士(后), 教授, 主要研究方向为宽带无线移动通信网络及网络优化.
- 徐中浩: 男, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为无线多跳网络路由算法.
- 曹建玲: 女, 1974 年生, 硕士, 讲师, 主要研究方向为无线传感器网络路由算法及仿真.
- 陈前斌: 男, 1967 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 通信与信息工程学院院长, 移动通信技术重庆市重点实验室主任, 主要研究方向为无线通信与网络.